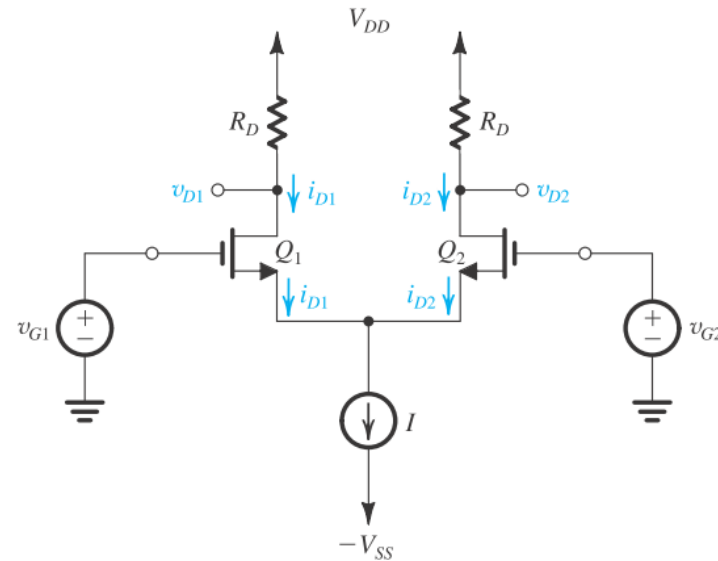
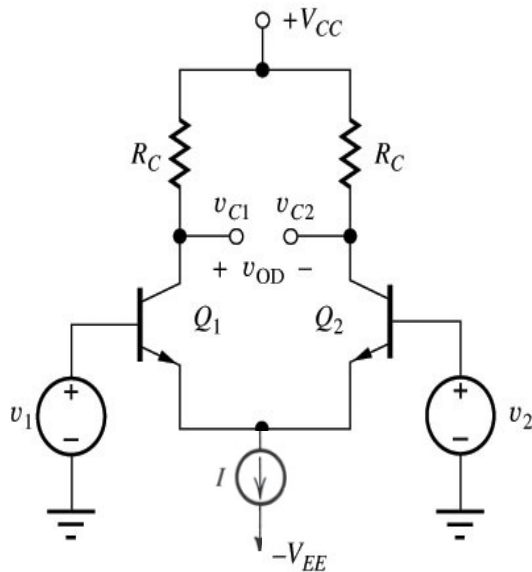

Amplificatore differenziale

Amplificatore differenziale

Un amplificatore differenziale (a MOS o BJT) ha il compito di amplificare la differenza delle tensioni che sono applicate ai suoi due terminali di ingresso. Le due figure in basso ne mostrano gli schemi:

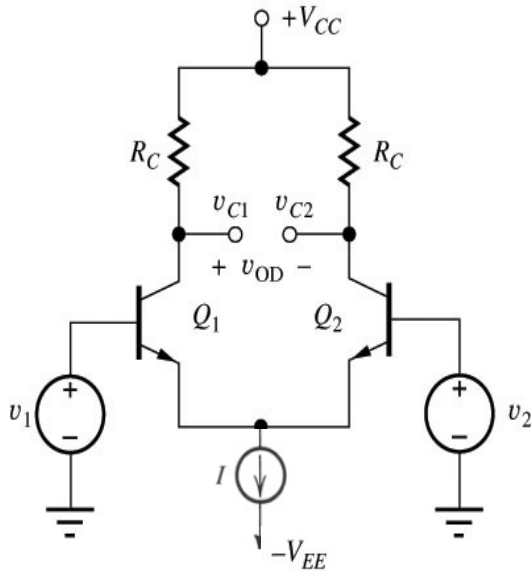


Amplificatore differenziale

Nel seguito focalizziamo la nostra attenzione sul circuito realizzato con BJT.

Notiamo che:

- Il differenziale è accoppiato in continua (non necessita di condensatori di blocco)
- Il circuito è alimentato grazie ad un generatore di corrente I , a sua volta realizzato con BJT (specchio di corrente – non approfondiamo ulteriormente questo punto).
- I due transistor e le due resistenze devono essere perfettamente uguali fra loro, per garantire la simmetria del circuito.
- Il circuito dispone di due uscite. In alcuni casi se ne utilizza una soltanto.



Modo comune e modo differenziale

In generale, date due tensioni v_1 e v_2 possiamo definire *il segnale differenziale*: $v_d = v_2 - v_1$

ed *il segnale di modo comune*: $v_{cm} = (v_2 + v_1) / 2$

Nessun amplificatore reale sarà in grado di amplificare solo la componente di modo differenziale. L'uscita sarà dipendente anche dal modo comune:

$$v_o = A_d v_d + A_{cm} v_{cm}$$

A_d =guadagno di modo differenziale

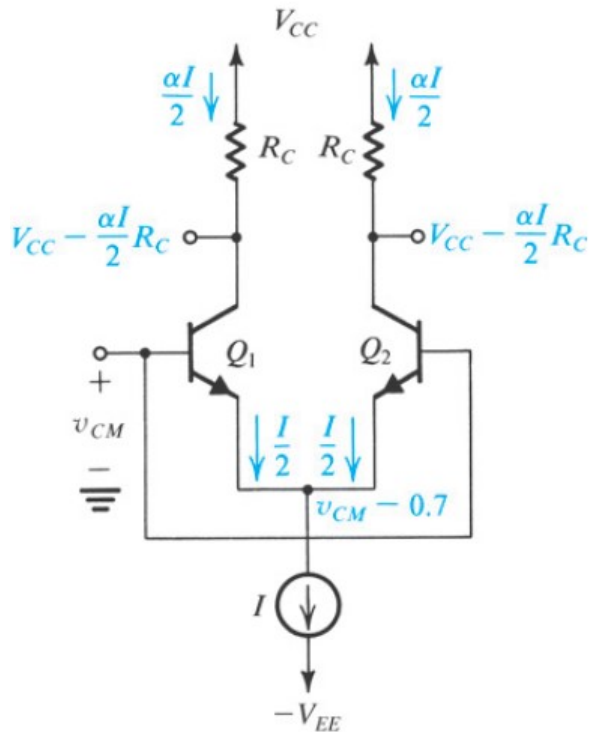
A_{cm} =guadagno di modo comune (idealmente 0)

Il parametro di merito di un amplificatore differenziale è il *rapporto di reiezione del modo comune (CMRR)*:

$$CMRR = |A_d / A_{cm}|$$

Analisi in DC

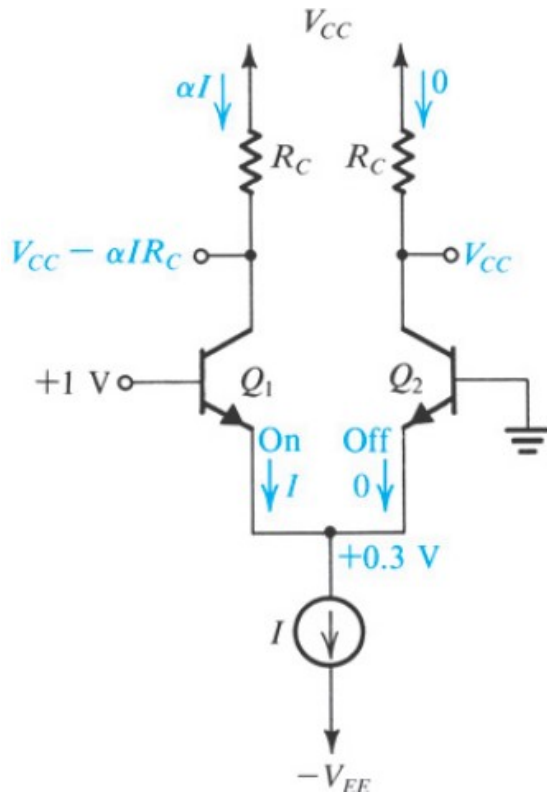
Supponiamo di collegare i due ingressi ad una stessa tensione v_{CM} (in questo modo, in ingresso c'è il solo modo comune, $v_d=0$):



Per simmetria, la corrente I si divide egualmente fra i due dispositivi, indipendentemente dal valore di v_{CM}

Analisi in DC

Sbilanciamo ora il circuito: applichiamo una tensione di 1V alla base di Q_1 , mentre la base di Q_2 è a massa:



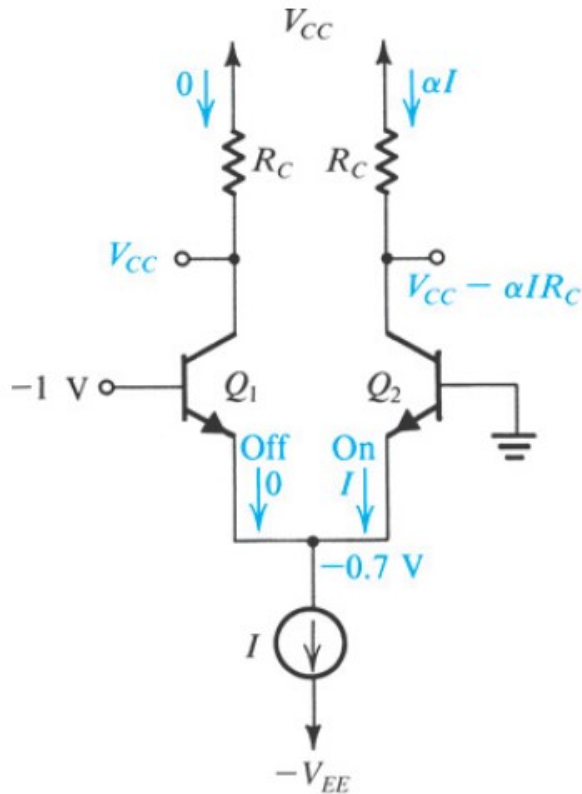
L'emettitore di Q_1 si porta a:
 $+1\text{V} - 0.7\text{V} = 0.3\text{V}$

La V_{BE} di Q_2 è di soli 0.3V e Q_2 è interdetto.

La corrente I circola solo in Q_1 .

Analisi in DC

Sbilanciamo ora il circuito in maniera opposta: applichiamo una tensione di -1V alla base di Q_1 , con la base di Q_2 a massa:

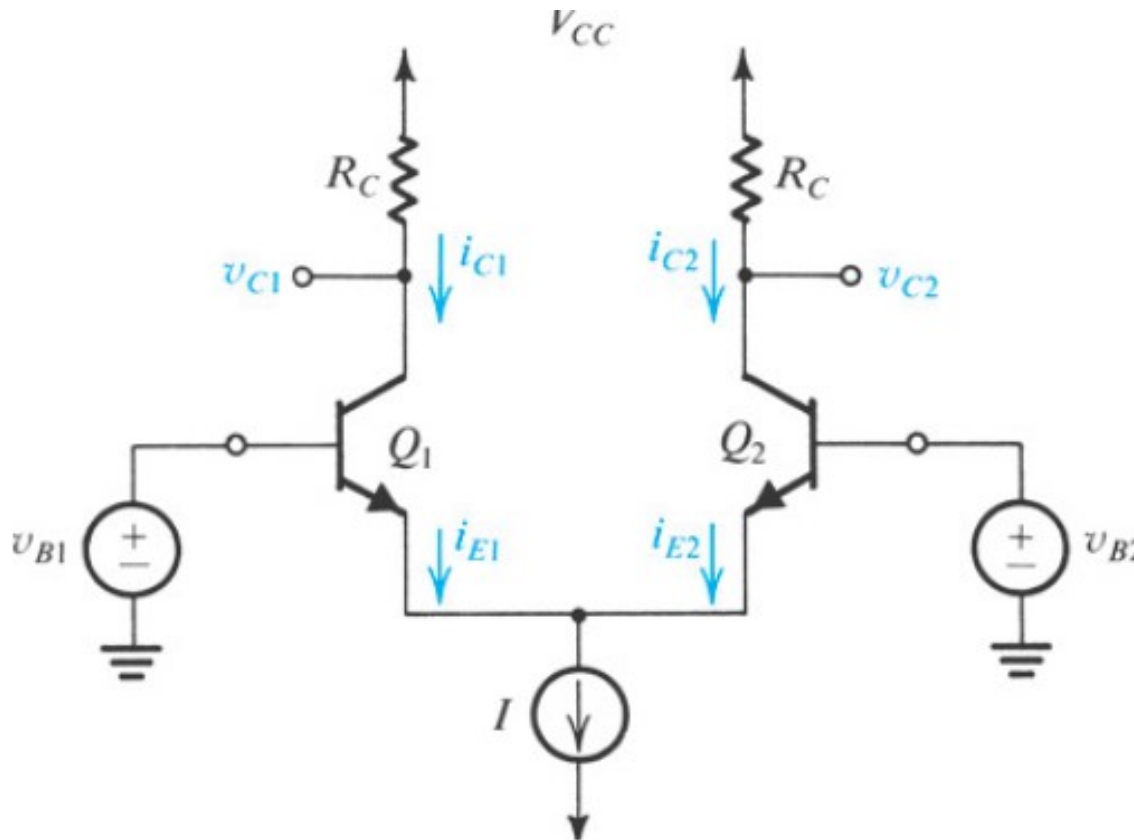


L'emettitore di Q_2 si porta a:
 $0\text{V} - 0.7\text{V} = -0.7\text{V}$

La V_{BE} di Q_1 è di -0.3V e Q_1 è interdetto.

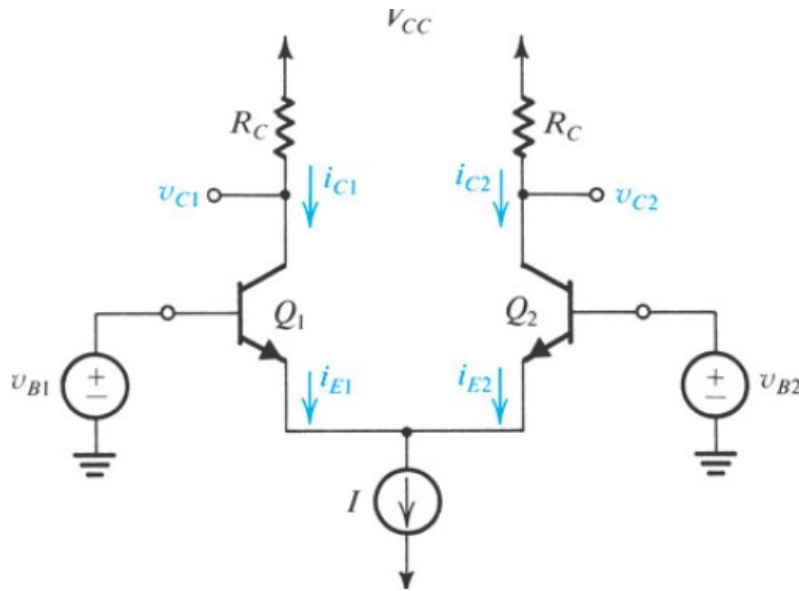
La corrente I circola solo in Q_2 .

Analisi in DC



L'analisi precedente mostra, in modo qualitativo, che la coppia differenziale si comporta come un **deviatore** che smista la corrente I nel ramo di sinistra o di destra, a seconda se v_{B1} è maggiore o minore di v_{B2} .

Caratteristica di trasferimento dell'Amplificatore Differenziale



Sappiamo che per un BJT in regione attiva diretta:

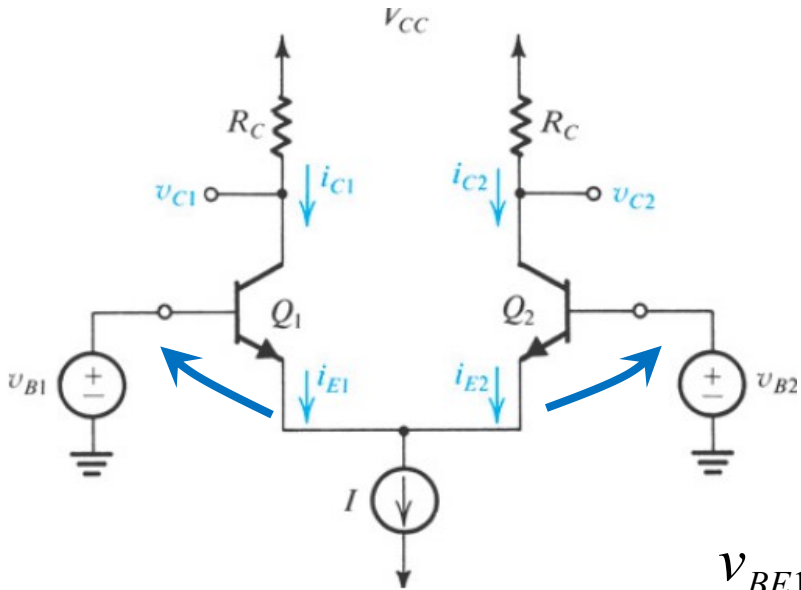
$$i_E = \frac{I_C}{\alpha} = \frac{I_S}{\alpha} \left(e^{v_{BE}/V_{th}} - 1 \right)$$

Applichiamo questa relazione a Q_1 e Q_2 , trascurando il termine -1 rispetto all'esponenziale e considerando $\alpha \approx 1$

$$i_{E1} \approx I_S e^{v_{BE1}/V_{th}}; \quad i_{E2} \approx I_S e^{v_{BE2}/V_{th}}$$

$$\frac{i_{E1}}{i_{E2}} = \frac{I_S e^{v_{BE1}/V_{th}}}{I_S e^{v_{BE2}/V_{th}}} = e^{(v_{BE1} - v_{BE2})/V_{th}}$$

Caratteristica di trasferimento dell'Amplificatore Differenziale



$$\frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{(v_{BE1} - v_{BE2})/V_{th}}$$

si ha: $v_{B1} = v_{BE1} - v_{BE2} + v_{B2}$

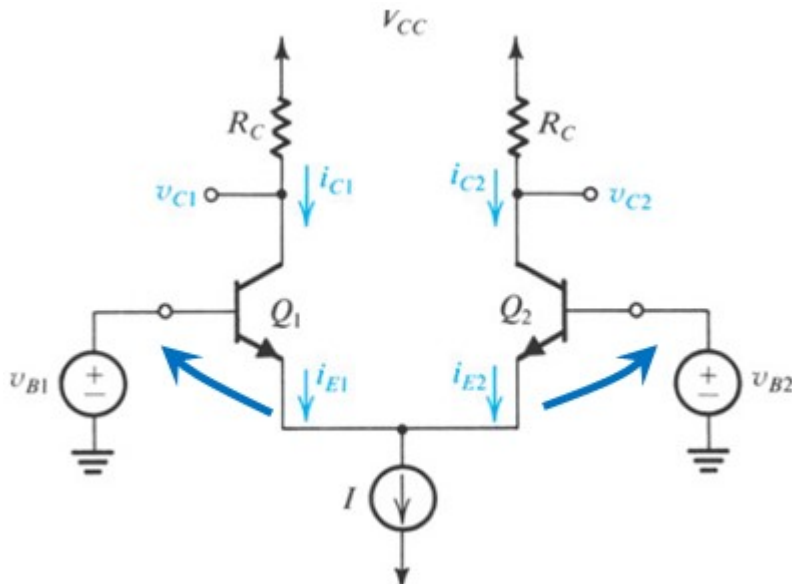
e quindi: $v_{BE1} - v_{BE2} = v_{B1} - v_{B2}$

$v_{BE1} - v_{BE2} = v_{id}$ con: $v_{id} \triangleq v_{B1} - v_{B2}$

v_{id} è la tensione di ingresso differenziale

$$\frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{v_{id}/V_{th}}$$

Caratteristica di trasferimento dell'Amplificatore Differenziale



$$\begin{cases} \frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{v_{id}/V_{th}} \\ i_{E1} + i_{E2} = I \end{cases}$$

Risolvendo il sistema si ha:

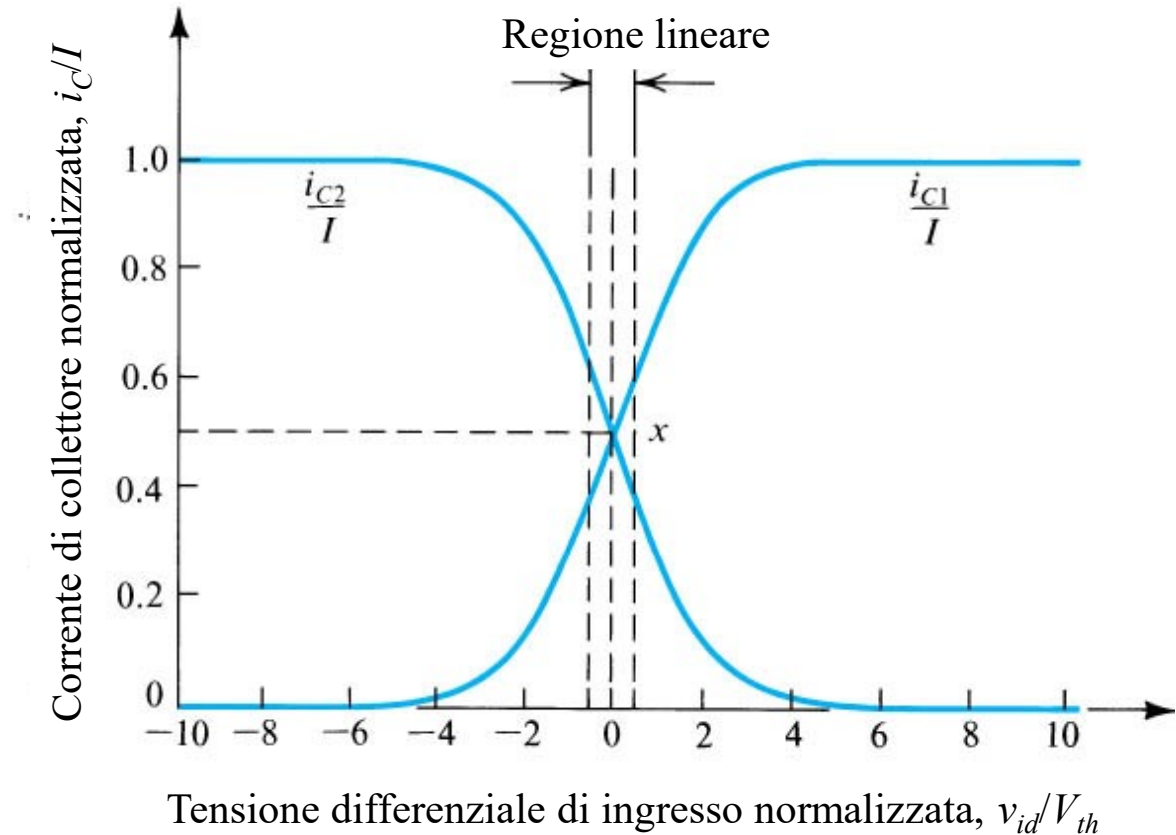
$$i_{E2} e^{v_{id}/V_{th}} + i_{E2} = I \quad \Rightarrow \quad i_{E2} = \frac{I}{1 + e^{v_{id}/V_{th}}}$$

$$i_{E1} = i_{E2} e^{v_{id}/V_{th}} = I \frac{e^{v_{id}/V_{th}}}{1 + e^{v_{id}/V_{th}}} \quad \Rightarrow \quad i_{E1} = \frac{I}{1 + e^{-v_{id}/V_{th}}}$$

L'andamento delle correnti di collettore è analogo

Caratteristica di trasferimento dell'Amplificatore Differenziale

$$i_{C1} = \frac{I}{1 + e^{-v_{id}/V_{th}}}$$
$$i_{C2} = \frac{I}{1 + e^{v_{id}/V_{th}}}$$



Analisi in AC dell'Amplificatore Differenziale

L'analisi verrà effettuata applicando il principio di sovrapposizione degli effetti.

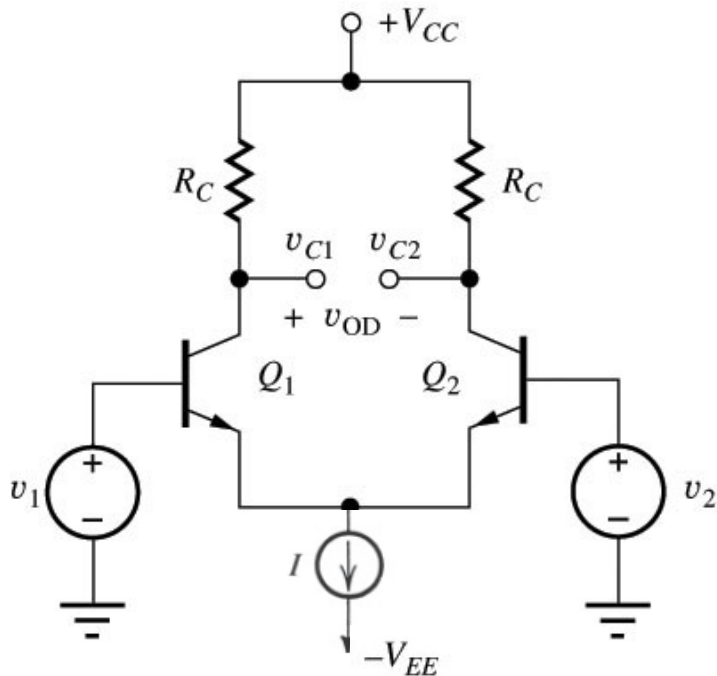
- Studiamo dapprima il caso di segnale di ingresso puramente differenziale (con modo comune pari a zero)
- In seguito considereremo un ingresso esclusivamente di modo comune (con componente differenziale nulla).

Ricordando che: $v_d = v_2 - v_1$ e: $v_{cm} = (v_2 + v_1) / 2$

Ingresso esclusivamente differenziale $\Rightarrow v_2 = v_d/2 ; v_1 = -v_d/2$

Ingresso esclusivamente di modo comune $\Rightarrow v_2 = v_{cm} ; v_1 = v_{cm}$

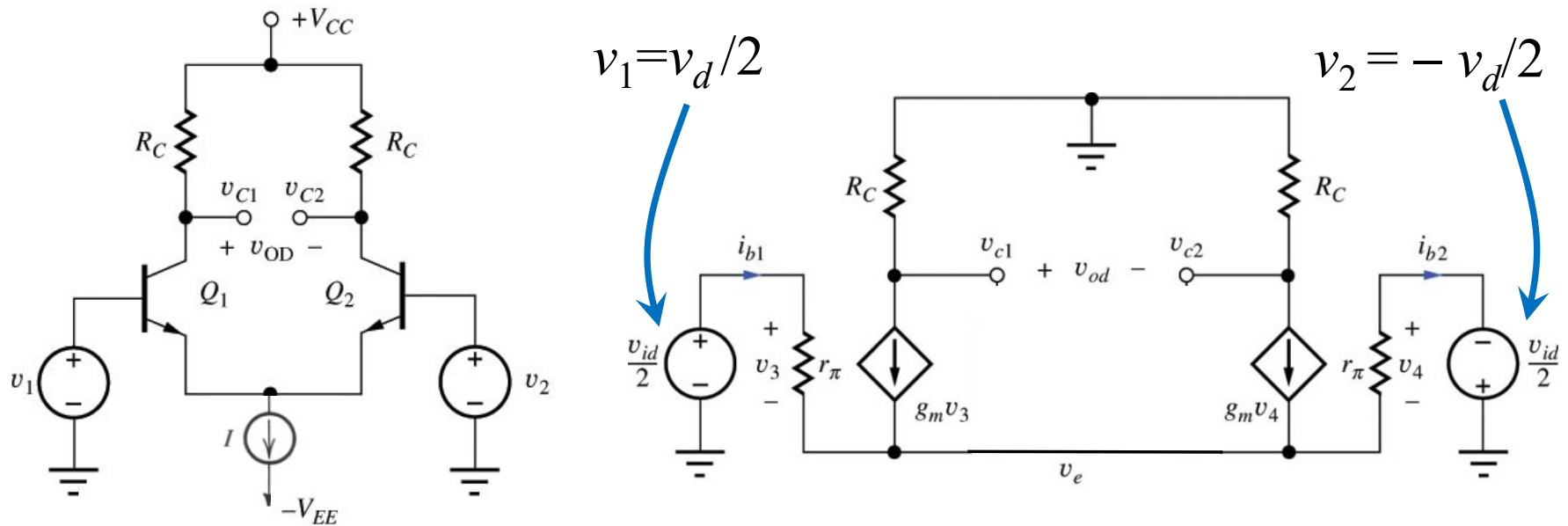
Analisi in AC: ingresso esclusivamente differenziale



Consideriamo un segnale d'ingresso puramente differenziale:

$$v_1 = v_d/2; v_2 = -v_d/2$$

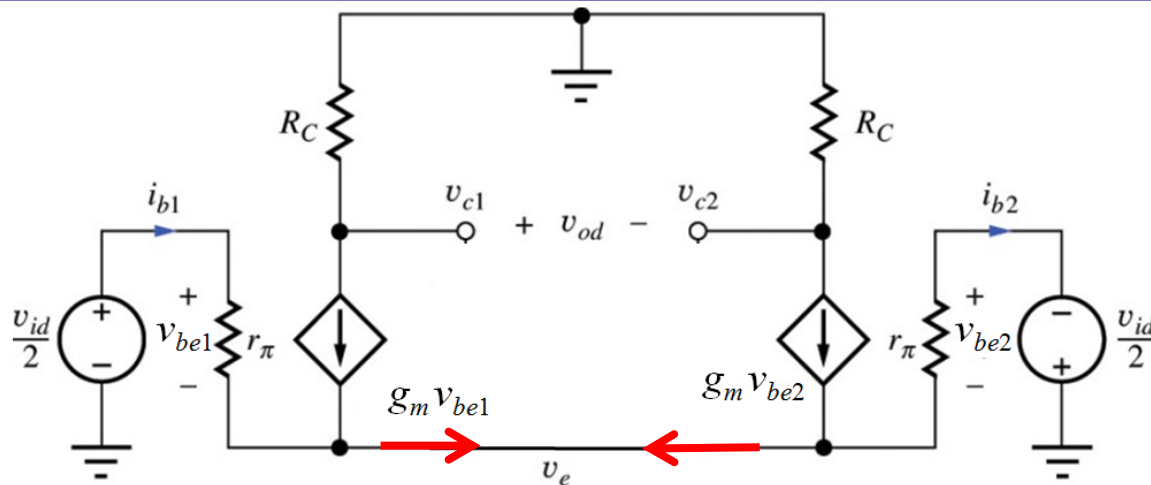
Analisi in AC: ingresso esclusivamente differenziale



Per semplicità, trascuriamo la r_o dei BJT

Si noti che nel modello a piccoli segnali il generatore di corrente costante I diviene un circuito aperto.

Analisi in AC: ingresso esclusivamente differenziale



Condizione di equilibrio delle due correnti in figura:

$$v_{be1} (g_m + 1/r_\pi) + v_{be2} (g_m + 1/r_\pi) = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{be1} = -v_{be2}$$

Indicando con v_e il potenziale dell'emettitore si ha:

$$\begin{cases} v_e = (v_{id} / 2) - v_{be1} \\ v_e = -(v_{id} / 2) - v_{be2} \end{cases} \quad \text{Risolvendo:} \quad \begin{cases} v_{be1} = (v_{id} / 2) - v_e \\ v_{be2} = -(v_{id} / 2) - v_e \end{cases}$$

Analisi in AC: ingresso esclusivamente differenziale

$$\begin{cases} v_{be1} = (v_{id} / 2) - v_e \\ v_{be2} = -(v_{id} / 2) - v_e \end{cases} \quad \text{Imponiamo la condizione} \quad v_{be1} = -v_{be2}$$

$$(v_{id} / 2) - v_e = (v_{id} / 2) + v_e \Rightarrow v_e = 0$$

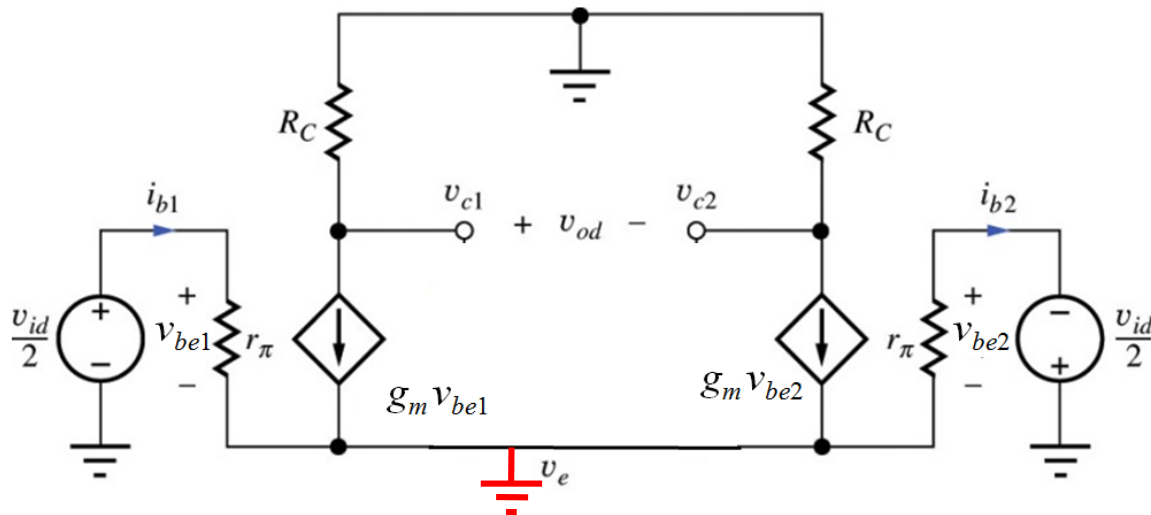
Nel modello a piccoli segnali si può quindi **considerare l'emettitore collegato virtualmente a massa** quando il segnale di ingresso è puramente differenziale.

Risulta anche:

$$v_{be1} = v_{id} / 2$$

$$v_{be2} = -v_{id} / 2$$

Analisi in AC: ingresso esclusivamente differenziale



$$v_e = 0$$

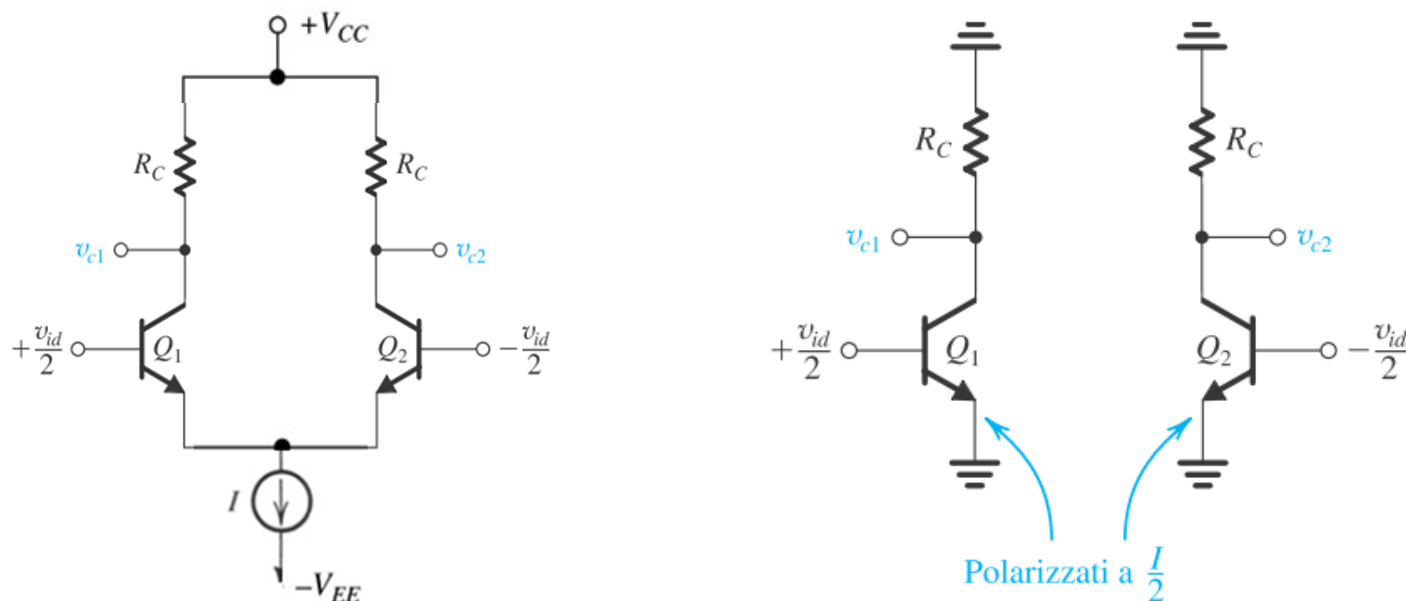
Nell'amplificatore differenziale, il nodo di emettitore è **virtualmente a massa** quando in ingresso è presente il solo modo differenziale.

$$v_{be1} = v_{id} / 2 \quad v_{be2} = -v_{id} / 2$$

Le tensioni di uscita sono: $v_{c1} = -g_m R_C \frac{v_{id}}{2}$ $v_{c2} = +g_m R_C \frac{v_{id}}{2}$

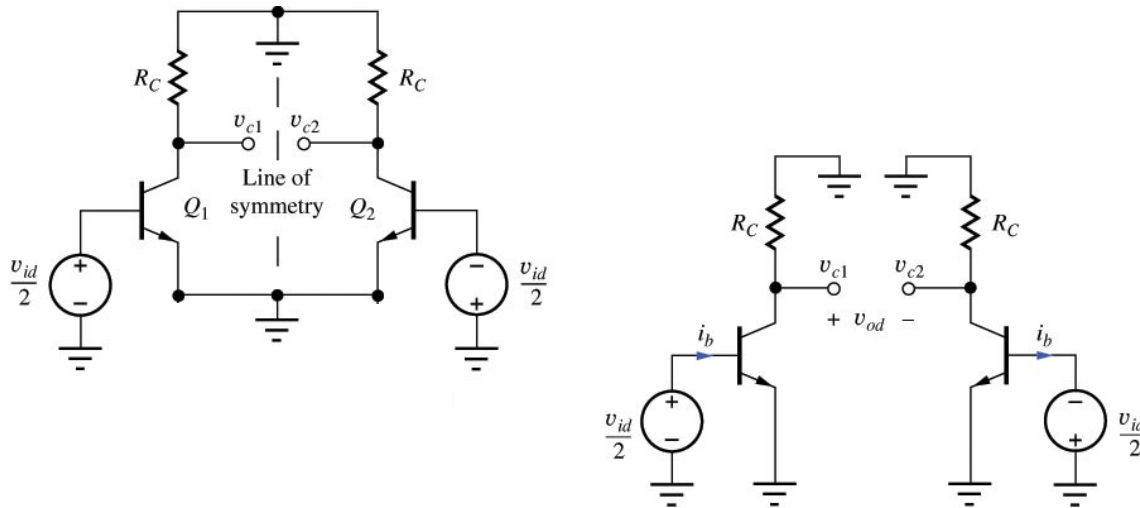
Prelevando l'uscita al collettore di Q_1 si ha: $A_d = -\frac{1}{2} g_m R_C$

Semi-circuiti equivalenti per il modo differenziale



Poiché per segnali di ingresso differenziali l'emettitore è virtualmente a massa, l'amplificatore si riconduce a due “semi-circuiti” equivalenti, in configurazione ad emettitore comune. I semi-circuiti equivalenti possono essere utilizzati per valutare più semplicemente guadagno, R_{in} , risposta in frequenza ecc.

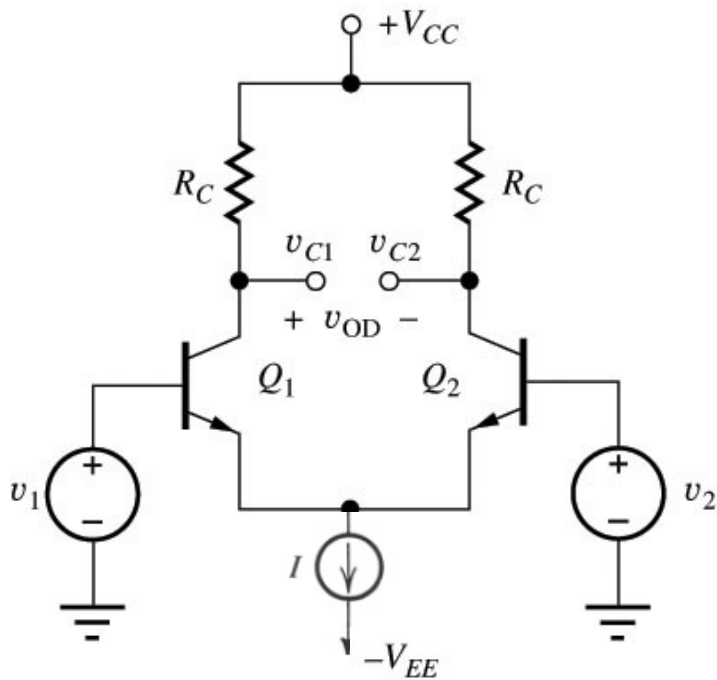
Analisi con il semi-circuito equivalente per il modo differenziale



L'analisi diretta del semi-circuito equivalente fornisce immediatamente:

$$v_{c1} = -g_m R_C \frac{v_{id}}{2} \quad v_{c2} = +g_m R_C \frac{v_{id}}{2} \quad R_{id} = v_{id} / i_{b1} = 2r_{\pi}$$

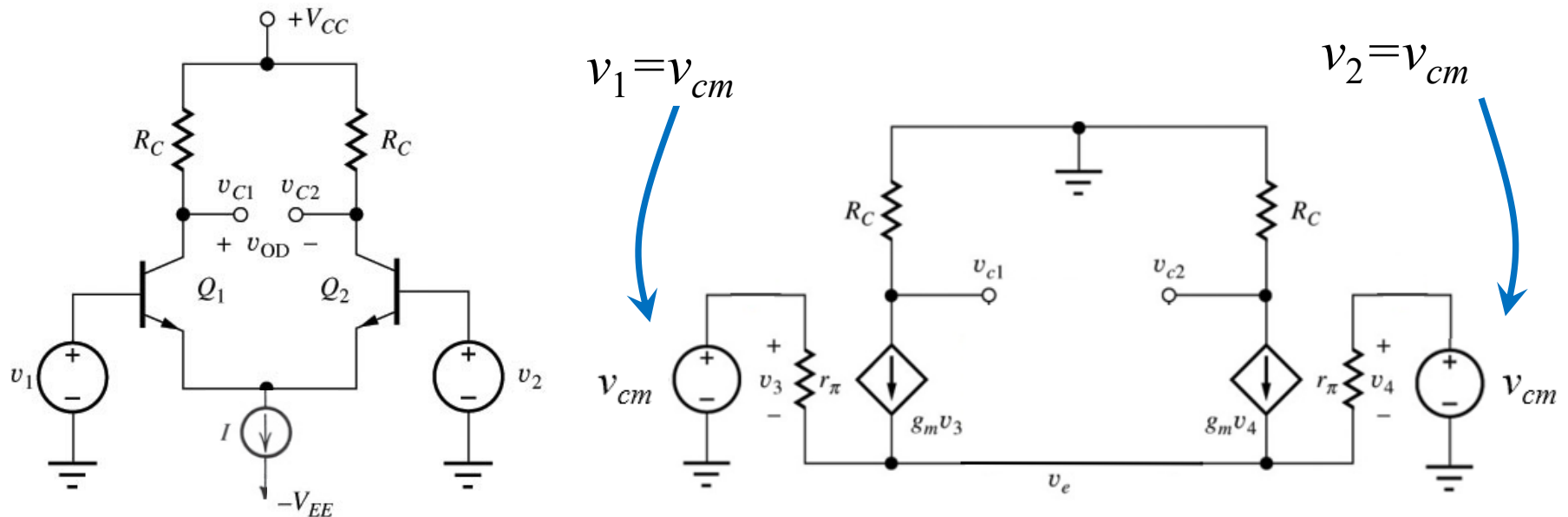
Analisi in AC: ingresso di modo comune



Consideriamo un segnale
d'ingresso di modo comune:

$$v_1 = v_{cm}; v_2 = v_{cm}$$

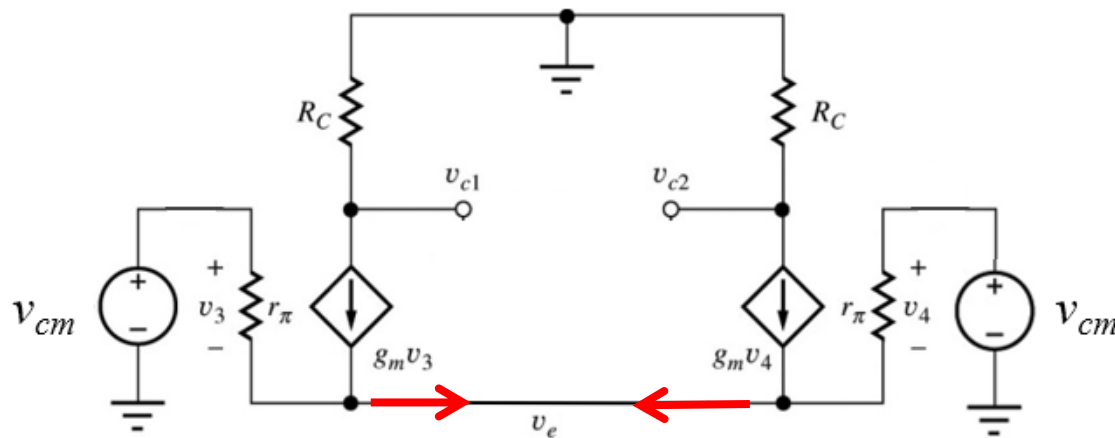
Analisi in AC: ingresso di modo comune



Per semplicità, trascuriamo la r_o dei BJT

Si noti che nel modello a piccoli segnali il generatore di corrente costante I diviene un circuito aperto.

Analisi in AC: ingresso di modo comune



Condizione di equilibrio delle due correnti in figura:

$$v_{be1} (g_m + 1/r_\pi) + v_{be2} (g_m + 1/r_\pi) = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{be1} = -v_{be2}$$

Indicando con v_e il potenziale dell'emettitore si ha:

$$\begin{cases} v_e = v_{ic} - v_{be1} \\ v_e = v_{ic} - v_{be2} \end{cases} \quad v_{be1} = v_{be2}$$

Analisi in AC: ingresso di modo comune

Devono essere contemporaneamente verificate le due condizioni:

$$\begin{cases} v_{be1} = -v_{be2} \\ v_{be1} = v_{be2} \end{cases}$$

La soluzione di queste due equazioni è: $v_{be1} = 0$; $v_{be2} = 0$

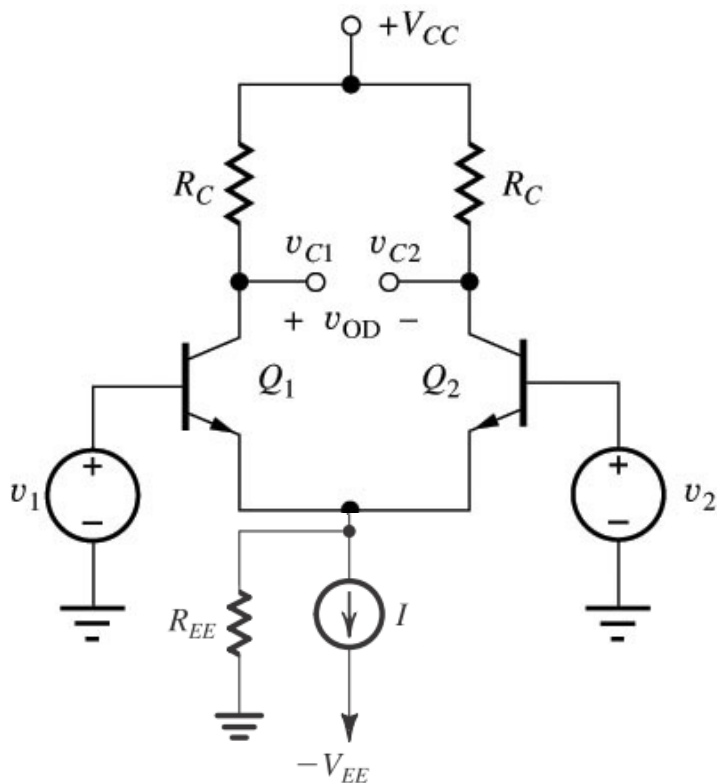
Risulta quindi: $v_{c1} = v_{c2} = 0$. I segnali di uscita sono nulli

Il guadagno di modo comune è zero

$$A_{cm} = 0$$

Analisi in AC: ingresso di modo comune.

Effetto della resistenza del generatore di corrente

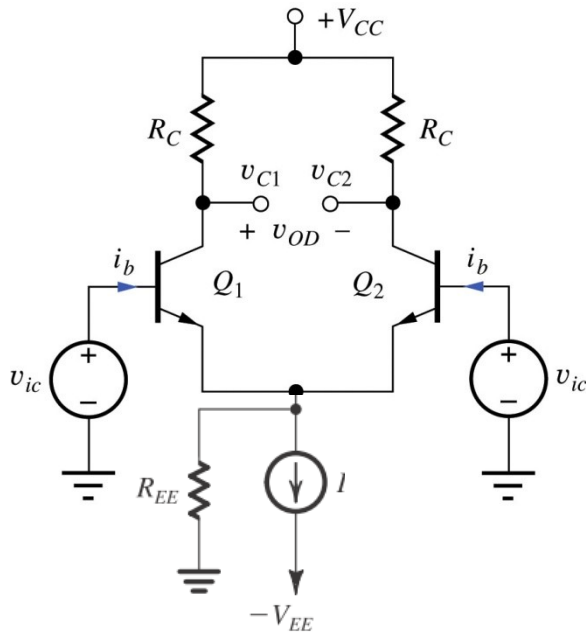


Il risultato ottenuto in precedenza ($A_{cm} = 0$ e quindi rapporto di reiezione del modo comune infinito) è eccessivamente ottimistico, ed è legato all'ipotesi di disporre di un generatore di corrente ideale per alimentare il circuito.

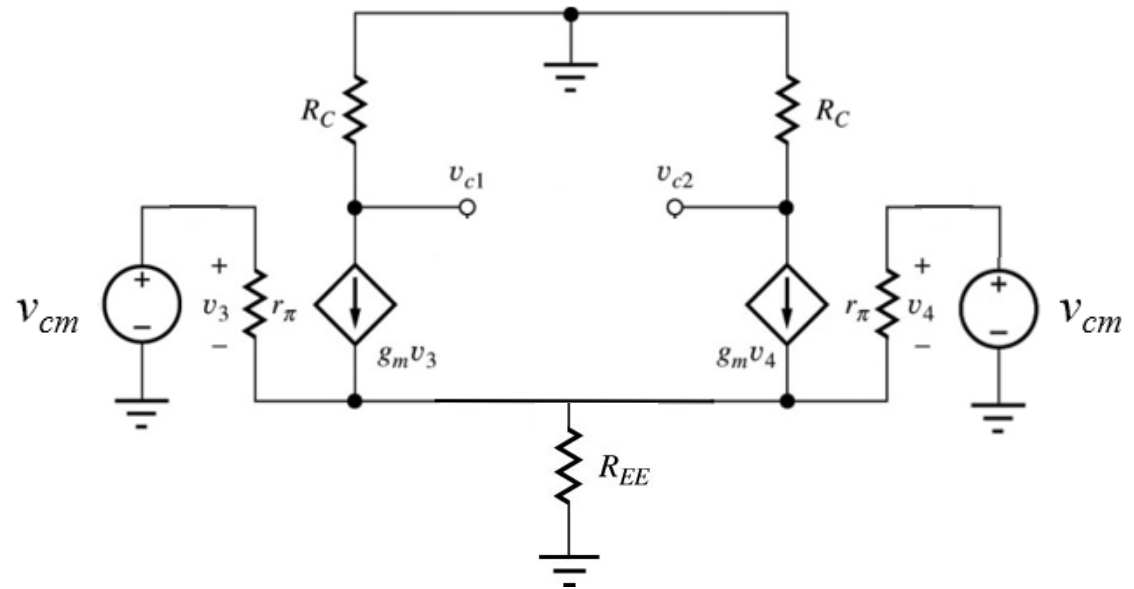
Rimuoviamo questa ipotesi, supponendo che il generatore di corrente I non sia ideale, e presenti una resistenza equivalente di Norton R_{EE} non infinita.

Analisi in AC: ingresso di modo comune.

Effetto della resistenza del generatore di corrente

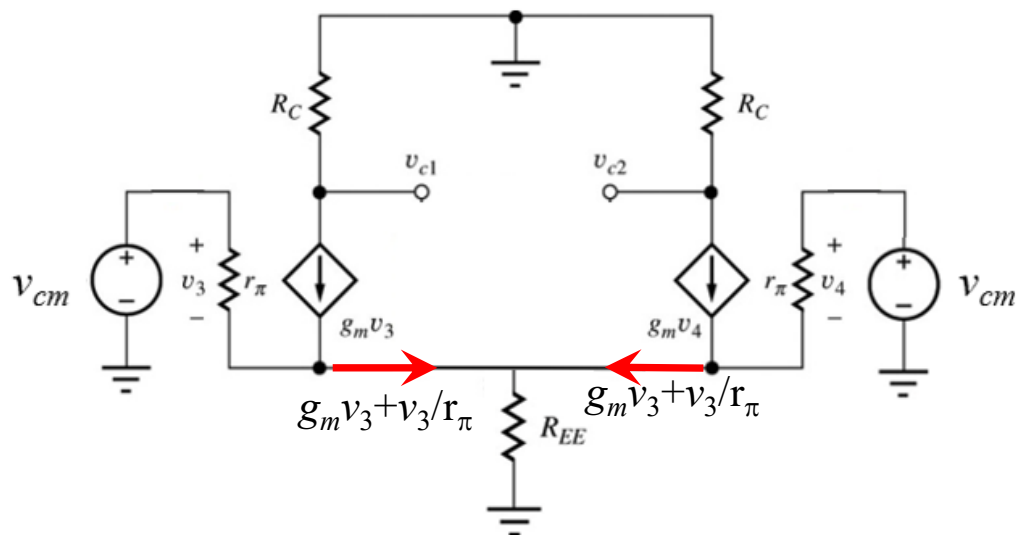


Consideriamo un segnale d'ingresso di modo comune e disegniamo il modello a piccoli segnali, con l'inclusione della resistenza R_{EE}



Analisi in AC: ingresso di modo comune.

Effetto della resistenza del generatore di corrente



Il circuito è perfettamente simmetrico, per cui avremo $v_3 = v_4$, $v_{c1} = v_{c2}$. Anche le due correnti evidenziate saranno uguali.

$$v_{cm} = v_3 + 2(g_m v_3 + v_3 / r_\pi) R_{EE} \Rightarrow v_3 = v_4 = \frac{1}{1 + 2(g_m + 1 / r_\pi) R_{EE}} v_{cm}$$

$$v_{c1} = v_{c2} = -\frac{g_m R_C}{1 + 2(g_m + 1 / r_\pi) R_{EE}} v_{cm} \approx -\frac{R_C}{2R_{EE}} v_{cm}$$

Analisi in AC: ingresso di modo comune.

Effetto della resistenza del generatore di corrente

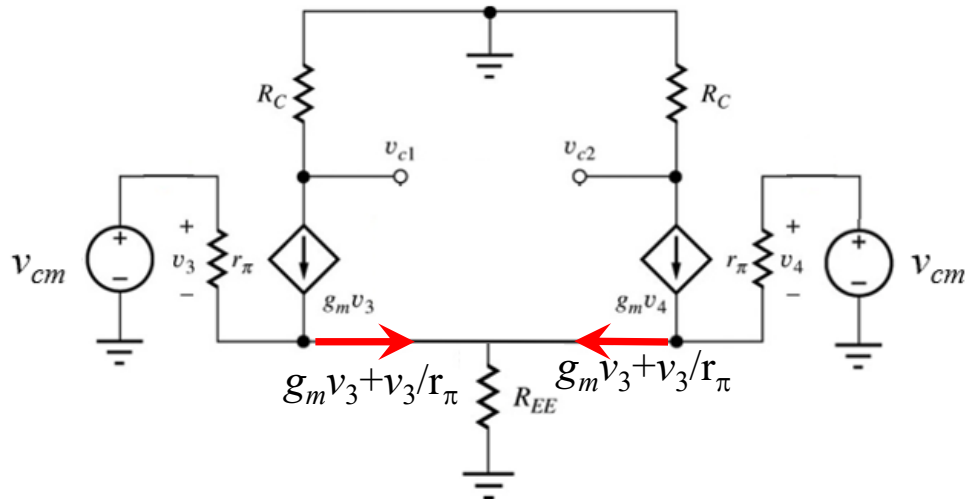
Risulta, pertanto:

$$A_{cm} = \frac{v_{c1}}{v_{cm}} \approx -\frac{R_C}{2R_{EE}}$$

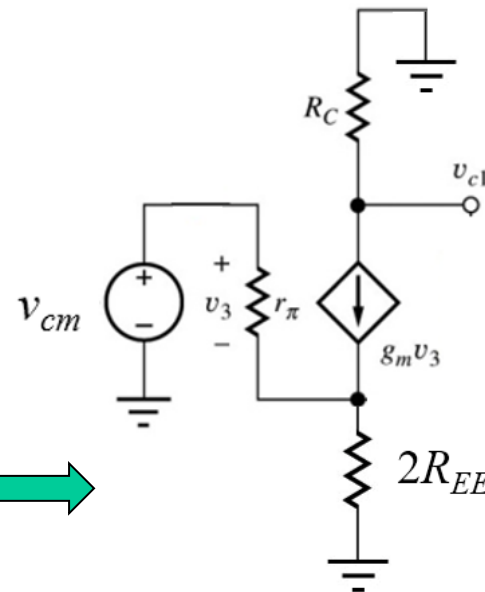
Da notare che per $R_{EE} \rightarrow \infty$ ritroviamo la condizione ottenuta in precedenza per il circuito alimentato dal generatore ideale di corrente: $A_{cm} = 0$

Analisi in AC: ingresso di modo comune.

Semi-circuito equivalente



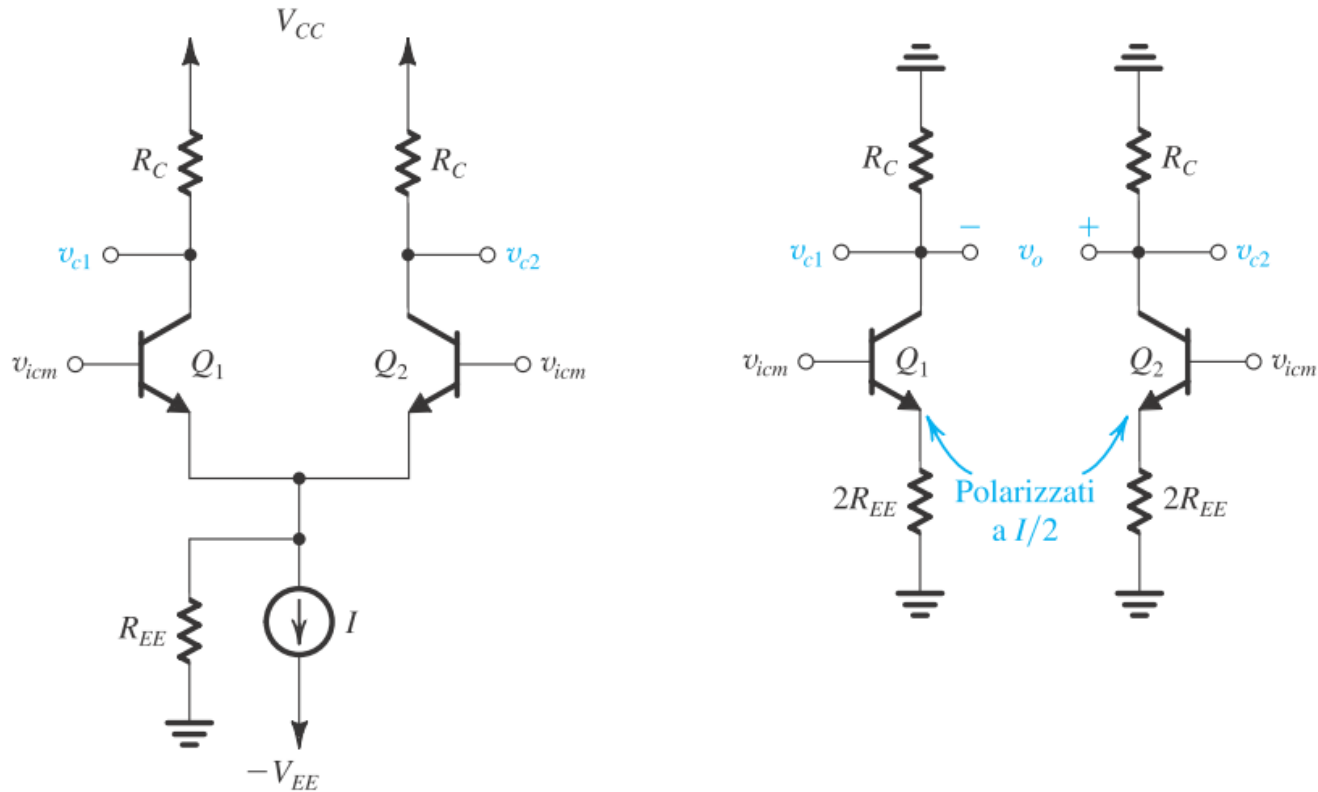
Circuito equivalente per segnale di modo comune. E' possibile considerare solo metà circuito, sostituendo R_{EE} con una resistenza di valore doppio



Es. 7.1 Sedra

Analisi in AC: ingresso di modo comune.

Semi-circuito equivalente



Il mezzo circuito equivalente per l'analisi del modo comune è un amplificatore ad emettitore comune, con una resistenza di emettitore $2R_{EE}$

Rapporto di reiezione del modo comune

- E' il rapporto fra il guadagno di modo differenziale ed il guadagno di modo comune: $\text{CMRR} = |A_d / A_{cm}|$
- Rappresenta la capacità del circuito di amplificare il segnale di ingresso desiderato, di modo differenziale, rigettando il segnale indesiderato di modo comune.
- $A_{cm} \approx -R_C / (2R_{EE}); \quad A_d = -g_m R_C / 2$

$$\text{CMRR} \approx g_m R_{EE}$$

In pratica, le asimmetrie fra i dispositivi (mismatch) producono una sensibile riduzione del CMRR